

**В. Б. УСПЕНСКИЙ**, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»  
**Н. Е. ХАЦЬКО**, аспирант НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ПАСПОРТИЗАЦИИ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА**

Розроблено новий експериментальний метод паспортизації датчиків вимірювання лінійного прискорення, який вирізняється тим, що може бути реалізований з використанням не атестованого лабораторного обладнання. Результати експерименту було оброблено з використанням нової методики і отримано параметри моделі похибок досліджуваного датчика.

Разработан новый экспериментальный метод паспортизации датчиков измерения линейного ускорения, отличающийся тем, что его можно реализовать с использованием не аттестованного лабораторного оборудования. Результаты эксперимента были обработаны с использованием новой методики и получены параметры ошибок исследованного акселерометра.

The new experimental method of the linear acceleration measuring sensors certification is developed. It is differing from other because it can be realized with using non certificated laboratorial equipment. The experiment results were processed by using of new methodology and certification parameters of investigated sensor measuring axis was obtained.

**Введение.** В настоящее время в различных технических устройствах широкое применение находят микроэлектромеханические системы (МЭМС). Относительно низкая стоимость МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров в сочетании с использованием сигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС стимулирует разработку малогабаритных интегрированных инерциально-спутниковых систем (ИИСС), используемых для навигации и управления движущимися объектами различного назначения.

Для повышения точности измерений МЭМС-датчиков в программном обеспечении ИИСС используются компенсирующие модели погрешности измерений, индивидуальные параметры которых определяются в лабораторных условиях в процессе паспортизации каждого датчика.

**Постановка задачи.** В данной статье рассматривается задача определения параметров модели погрешности микроакселерометра с целью ее дальнейшей алгоритмической компенсации и, как следствие, повышения точности функционирования ИИСС.

Известно, что подобные методики строятся либо на прямых измерениях ускорения в сравнении с эталоном [1], либо по результату функционирования алгоритмов инерциальной навигации [2]. Чаще всего оба подхода сочетаются: первый обеспечивает получение «грубых» оценок, которые затем используются для компенсации во время применения второго, уточняющего, подхода.

Предлагаемая методика относится к первой группе. Ее отличительная особенность – применимость для одного датчика, а не для трех, как в [3], а также использование простейшего лабораторного оборудования и оснастки.

Таким образом, решаемая задача состоит в разработке и экспериментальной проверке методики определения инструментальных погрешностей микроакселерометра, применимой в условиях плохого метрологического обеспечения.

#### **Описание стенда и условий проведения измерений.**

Для проведения эксперимента был использован поворотный стол, опорная платформа которого может вручную поворачиваться вокруг одной из горизонтальных осей на угол до  $\pm 65$  град. с точностью в несколько угловых минут. На платформу крепится модуль, сделанный в виде профилированного куба, с паспортизируемым акселерометром, ось чувствительности которого параллельна посадочной площадке модуля. Исследуемый акселерометр (ADXL203 фирмы Analog Device) благодаря высокой чувствительности применим для измерения статического гравитационного ускорения и определения угла наклона оси чувствительности датчика относительно горизонтальной плоскости. Эта особенность использована в разработанной методике. Аналоговый выход акселерометра оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя ADS110. Измерения обновляются с частотой 50 Гц и для уменьшения влияния шума усредняются на интервале времени 30 сек. Серии измерений проводятся для разных углов наклона платформы в одной установке модуля на платформе и одном запуске датчика.

**Модель и погрешности измерений.** Однократное оцифрованное измерение акселерометра в момент времени  $t_k$  можно представить в виде целого числа импульсов

$$N^* = \text{Entier} \left[ \frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^* + \xi}{k^*} \right], \quad (1)$$

где  $g$  - модуль ускорения свободного падения;  $\alpha^*$  - истинный угол наклона оси чувствительности датчика относительно плоскости горизонта;  $\delta \alpha^*$ ,  $\xi$  - соответственно смещение «нуля» и случайный дрейф измерителя, приведенные к размерности  $\text{м/с}^2$ ;  $k^*$  - фактическое значение масштабного коэффициента. Ближайшей к (1) «гладкой» зависимостью является выражение

$$N = \frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^* + \xi}{k^*}, \quad (2)$$

относительно которого можно утверждать, что

$$N = (N^* + 0.5 \cdot \text{sign}(N^*)) + \nu,$$

где  $\nu$  - реализация в момент времени  $t_k$  центрированной случайной величины из отрезка  $[-0.5; +0.5]$  - ошибки дискретизации. Если вместо  $N$  и  $N^*$  воспользоваться значениями  $\hat{N}$  и  $\hat{N}^*$ , полученными усреднением на достаточно большом количестве измерений, то очевидно, что  $\hat{N} \approx \hat{N}^* + 0.5 \cdot \text{sign}(\hat{N}^*)$ . Таким образом, после усреднения выражение (2) можно представить в виде

$$\hat{N}^* + 0.5 \cdot \text{sign}(\hat{N}^*) = \frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^*}{k^*}. \quad (3)$$

В этих условиях задача паспортизации состоит в получении оценок  $\delta \alpha$ ,  $k$  одноименных параметров модели (1) по измерениям  $\hat{N}^*$  при различных устанавливаемых углах  $\alpha^*$ . В основу решения задачи полагается соотношение (3).

**Линеаризация модели.** Представим истинное значение угла  $\alpha^*$  в виде

$$\alpha^* = \alpha + \delta \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - установленный с помощью поворотного механизма угол наклона платформы;  $\delta \alpha$  - постоянная методическая ошибка, связанная с неточностью исходной выставки платформы относительно горизонтальной плоскости, не идеальностью формы модуля и не точностью монтажа датчика на посадочной площадке.

Для фактического масштабного коэффициента  $k^*$  аналогично примем:

$$k^* = k_0 + \delta k, \quad (5)$$

где  $k_0$  - некоторое номинальное значение коэффициента, определяемое по специальной методике;  $\delta k$  - неизвестная поправка, индивидуальная для каждого датчика.

Пользуясь предположением сопоставимой малости и постоянства в запуске параметров  $\delta \alpha$ ,  $\delta k$ ,  $\Delta k = \delta k / k_0$  - относительной погрешности коэффициента, для (3) с учетом (4), (5) получаем линейное приближение

$$\delta \alpha + g \cos \alpha \cdot \delta \alpha - g \sin \alpha \cdot \Delta k = (\hat{N}^* + 0.5 \text{sign}(\hat{N}^*)) k_0 - g \sin \alpha, \quad (6)$$

правая часть которого вычисляется по фактическим измерениям, в левая содержит искомые параметры модели погрешности.

Полученное уравнение (6) является определяющим соотношением методики и полагается в основу решения задачи идентификации. Таким образом, для определения искомых параметров следует провести ряд измерений, с учетом которых построить и решить систему линейных алгебраических уравнений вида (6). Легко видеть, что для невырожденности матрицы системы достаточно провести измерения при существенно различных углах наклона платформы.

**Критерии достоверности идентификации погрешности акселерометра.** Одним из способов подтверждения достоверности разработанной методики является имитационное моделирование показаний акселерометров по формуле (1) и работы самой методики. Критерием достоверности в этих условиях является совпадение погрешностей, используемых при имитационном моделировании, и результатов идентификации.

Уже на этапе моделирования установлено, что случайные погрешности, вносимые специально и спонтанно возникающие вследствие вычислительных ошибок, не позволяют устойчиво оценить искомые характеристики при малом числе измерений. Поэтому методика предполагает проведение серии измерений, числом существенно более 3, при различных углах наклона платформы. Получаемая при этом избыточная система линейных уравнений решается с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

При обработке экспериментальных данных приведенный выше критерий достоверности по очевидным причинам не применим. В этих условиях косвенным показателем достоверности получаемых результатов является, во-первых, их правдоподобность, во-вторых, стабилизация оценки, получаемой с помощью МНК при увеличении числа измерений, в-третьих, - воспроизводимость получаемых оценок в различных запусках измерителя.

### **Методика проведения эксперимента.**

#### **1. Горизонтирование поверхности поворотного стола.**

Плоскость опорной платформы устанавливается горизонтально при помощи пузырьковых уровней, расположенных на основании стола.

#### **2. Проведение измерений и определение номинального значения масштабного коэффициента по формуле**

$$k_0 = \frac{2g}{N^{\uparrow} - N^{\downarrow}}, \quad (7)$$

в которой  $N^{\uparrow}$  и  $N^{\downarrow}$  - измерения ускорения свободного падения при расположении оси чувствительности акселерометра «вверх» и «вниз» соответственно. Измерения усредняются в каждом положении на интервале 60 сек., в результате чего было получено значение  $0,00769 \text{ м/с}^2$ .

#### **3. Проведение измерений для оценки погрешностей АИ.**

Измеряется величина проекции вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности АИ для шестидесяти различных углов наклона

платформы к горизонтальной плоскости с шагом в  $1^\circ$ . Измерения проводятся в нескольких сериях для оценки воспроизводимости результатов.

#### 4. Обработка и анализ результатов:

- по результатам измерений в запуске составляется избыточная система уравнений вида (6) и вычисляются оценки искомых параметров;
- контролируется вычисляемая оценка по введенному критерию стабилизации (рис.1);

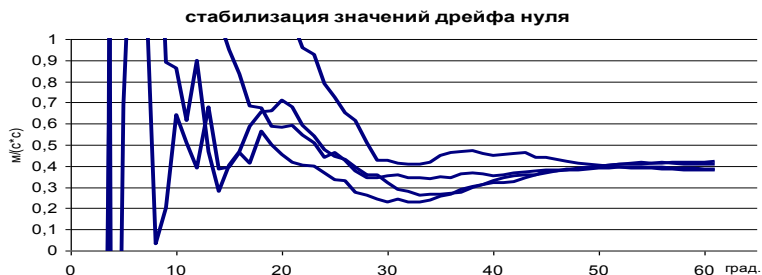


Рис. 1. Стабилизация оценок в ходе работы МНК по измерениям серии экспериментов

- моделируется ряд измерений с внесенными в него погрешностями, вычисленными ранее, и строятся невязки измеренных и модельных значений ряда для оценивания качества аппроксимации (рис.2);

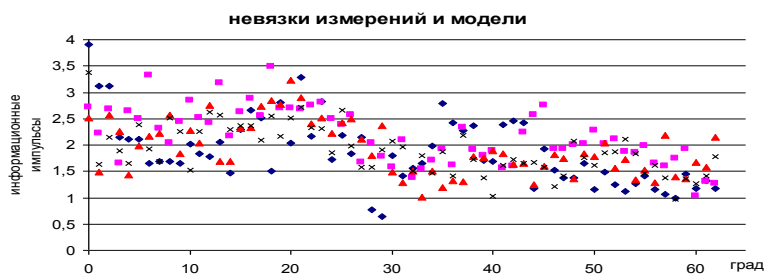


Рис. 2. Невязки измерений и модельных рядов

- для каждого параметра в различных запусках вычисляется среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Строятся доверительные интервалы отклонений величины параметра (рис.3);
- оценивается воспроизводимость оценок и находится пересечение доверительных интервалов для каждого параметра. По результирующему интервалу делается вывод о параметрах компенсирующей модели погрешности измерений.

По горизонтальной оси на графиках отложены значения углов выставки опорного стола, по вертикальной – количество информационных импульсов.

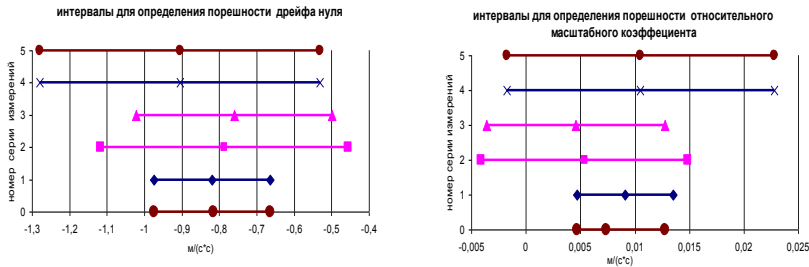


Рис. 3. Доверительные интервалы отклонения величины параметра

### Выводы

1. Введение компенсационной модели погрешностей в обработку измерений АИ снизили совокупный уровень ошибки измерения в одной серии запусков с 0,9 до 0,2 информационного импульса (рис.4).
2. Остаточная погрешность измерений находится на уровне воспроизводимости результатов паспортизации АИ в различных запусках.
3. Влияние изменения внешней температуры и уровня измеряемого сигнала (из ограниченных диапазонов) на совокупную погрешность измерений незначительна.

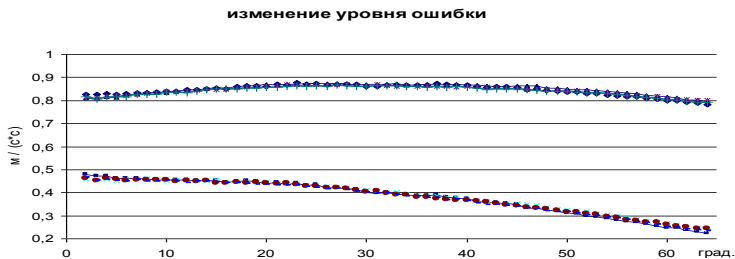


Рис. 4. Изменение уровня ошибки после введения компенсационных паспортных погрешностей

4. В результате реализации описанной методики получены следующие указанные в приводимой справа таблице значения погрешностей для трех экземпляров АИ серии ADXL203.

Погрешности:	дрейфа нуля	относ. масшт. коэф.
Экземпляр 1	0,08	0,01
Экземпляр 2	0,37	0,024
Экземпляр 3	-0,82	0,001

**Заключение.** В данной работе изложена методика калибровки АИ на основе измерения ускорения свободного падения. Построена модель погрешности измерений АИ, получено определяющее соотношение; критерии оценки эффективности методики; описаны эксперимент, обработка и анализ результатов. Разработанная методика позволяет за счет стендовой калибровки и дальнейшего использования компенсационной модели существенно повысить точность измерения кажущегося ускорения. Результаты апробации убеждают в эффективности методики.

**Список литературы:** 1. Лене С.Н. Математическое моделирование скалярного метода калибровки избыточных измерителей ускорения. // Научные труды «МАТИ» - РГТУ им. Циолковского, 2005. - вып.4 (80).-С.205-209. 2. Блинов М.С. Вахитов Т.Н., Колчев А.Б., Успенский В.Б. Оценка параметров углов неортогональностей с помощью прямой методики и по результатам решения навигационной задачи // Гирокоспия и навигация. - 2004. - №4 (47). – С.77-80. 3. Аникейчев В.С., Атаманов Н.А., Поликовский Е.Ф. Методика калибровки акселерометров // XXI научно-техн. конф. памяти Н.И. Острякова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор». - 1998.

*Поступила в редакцию 05.02.09*

УДК 004.89:65.011.56

**А.Е. ГОЛОСКОКОВ**, профессор НТУ «ХПИ»,  
**А.В. РУДНИЦКИЙ**, аспирант НТУ «ХПИ»

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕЧИ ПРОКАТНОГО СТАНА В ЗАДАЧЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПЕЧИ**

Авторами статті сформована математична модель печі прокатного стану в задачі інтелектуального управління температурою. Математическая модель построена в виде дифференциальных уравнений, затем по полученным уравнениям построены передаточные функции. Реализация модели осуществлена в математическом пакете MATLAB.

Авторами статті сформована математическая модель печи прокатного стана в задаче интеллектуального управления температурой. Математична модель наведена у вигляді диференціальних рівнянь, наступним кроком на основі цих рівнянь побудовані передатні функції. Модель реалізована у математичному пакеті MATLAB.

Mathematical model of rolling mill kiln in task of temperature intelligent control has been built by article authors. Mathematical model purposed as differential equations, next step was transfer functions development based on differential equations. Model was implemented in mathematical package MATLAB.

**Введение.** В предыдущих статьях авторов [1-3] установлена необходимость построения аналитической модели печи прокатного стана. В